

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННАЯ ПРИ ПОМОЩИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ВТОРИЧНЫМ ТОКОМ

А. С. Багинская

(Представлено профессором, доктором техн. наук. И. Д. Кутявиным)

Несмотря на ряд мероприятий, направленных на повышение селективности дифференциальной защиты генераторов (завышение уставки реле до значений, превышающих номинальный ток, использование быстронасыщающихся трансформаторов), процент ее правильных действий остается на чрезвычайно низком уровне. Так, по данным Технического управления МЭС, процент правильной работы продольной дифференциальной защиты генераторов в 1953 г. составил 76,2%, в то время как процент правильных действий всей релейной защиты в целом превысил 99%.

Анализ работы продольной дифференциальной защиты генераторов говорит о том, что одной из весьма частых причин ее ложных действий являются большие токи небаланса, появляющиеся в реле при внешних коротких замыканиях. Такие отключения являются наиболее опасными, так как вывод из работы генератора, особенно большой мощности, при коротком замыкании в системе может привести к ее полному расстройству.

Применение в схеме дифференциальной защиты гидрогенераторов быстронасыщающихся трансформаторов не исключает ошибочной работы защиты при внешних замыканиях, поскольку ток небаланса не всегда имеет резко выраженный асимметричный характер. Задержка в срабатывании такой защиты, вызываемая асимметричным характером тока повреждения и усугубляемая низкими коэффициентами чувствительности, является весьма существенным ее недостатком.

Заглубление защиты до $I_{сз} = (1,3—1,5) I_{нз}$, как это принято в настоящее время по рекомендации Технического управления МЭС для турбогенераторов, не избавляет защиту от ложных действий при внешних коротких замыканиях, поскольку, как показали исследования, проведенные в ЦНИЭЛ МЭС [1], переходные токи небаланса могут достигать нескольких десятков ампер. Последние обязаны наличию в сердечниках трансформаторов тока защиты к моменту сквозного замыкания остаточных потоков, разных по величине, а иногда и по направлению (после отключения внутреннего повреждения или ликвидации обрыва вторичной цепи трансформатора).

С целью ликвидации остаточных потоков отдельные авторы предлагают выполнять схему дифференциальной защиты генераторов при помощи специальных трансформаторов тока (с воздушным сердечником или зазором, с малым объемом стали, с подмагничиванием от постороннего источника).

Устранить влияние остаточного магнетизма на работу дифференциальной защиты генераторов можно также путем применения для нее трансформаторов тока с подмагничиванием вторичным током.

Такие трансформаторы имеют устройство, аналогичное устройству компенсированных трансформаторов тока с противонамагничиванием, предназначенных для измерительных целей. В отличие от последних параметры данных трансформаторов тока определяются из условия намагничивания их нормальным рабочим током до индукции в 6 000—7 000 гс. Тогда при вторичном токе, составляющем 50 % номинального (работа генератора с меньшей нагрузкой маловероятна), сердечники трансформаторов тока (при принятой для изготовления их марке стали) будут намагничены до индукции в 3 500—4 000 гс. Влияние остаточных потоков на работу дифференциальной защиты, как показали опыты, при этом незначительно.

При анализе свойств дифференциальной защиты генераторов, выполненной при помощи трансформаторов тока с подмагничиванием вторичным током, важно выяснить вопрос о влиянии объема стали трансформаторов на чувствительность и селективность защиты. До последнего времени дифференциальная защита генераторов выполнялась при помощи трансформаторов тока класса Д с большим объемом стали. При этом считалось, что достигаемое таким образом уменьшение номинальной индукции способствует снижению токов небаланса. Б. А. Нечаев в 1952 г. рекомендовал для дифференциальной защиты генераторов трансформаторы тока с малым объемом стали, утверждая, что переходные токи небаланса при этом уменьшатся [2]. Кроме этого, автор показывает, что отдача трансформаторов тока с малым объемом стали при внутренних повреждениях не хуже отдачи трансформаторов с большим сечением сердечника, и благодаря этому чувствительность предлагаемой им защиты не ниже чувствительности защиты, использующей трансформаторы тока класса Д. Этот вывод Б. А. Нечаева весьма сомнителен, поскольку при уменьшении объема стали отдача трансформаторов тока не может оставаться неизменной (см. ниже). В связи с этим необходимо дальнейшее более глубокое исследование вопроса о влиянии объема стали трансформаторов тока на чувствительность и селективность дифференциальной защиты. Для решения данного вопроса воспользуемся математическим анализом работы схемы дифференциальной защиты при установившемся и переходном процессах с последующей проверкой его результатов экспериментальным путем.

Точный математический анализ схемы защиты с учетом нелинейности электрических цепей, явления перемагничивания трансформаторов тока и т. д. выполнить невозможно ввиду его исключительной сложности. Однако зависимости качественного порядка можно было бы установить, приняв для облегчения решения поставленной задачи целый ряд допущений, а именно, считая сопротивление намагничивания трансформаторов тока не зависимым от тока намагничивания, пренебрегая потерями в стали и индуктивностями вторичных обмоток трансформаторов и считая сопротивление цепи реле равным нулю. Последнее допустимо при отсутствии в цепи реле добавочных сопротивлений. Э. д. с. обмоток подмагничивания в этом случае будет представлять собой не что иное как э. д. с. самоиндукции, а связь сопротивления самоиндукции обмоток подмагничивания с сопротивлением намагничивания трансформаторов тока выразится соотношением:

$$X_{n/m} = X_{ам} \left(\frac{\omega_{n/m}}{\omega_2} \right)^2, \quad (1)$$

где $\omega_{n/m}$ — число витков в подмагничивающих обмотках;

ω_2 — число витков вторичной обмотки.

На рис. 1 показана схема замещения дифференциальной защиты генератора, выполненная по принципу циркуляции вторичных токов и использующая трансформаторы тока с последовательным подмагничиванием. На ней сплошными линиями показаны направления токов при внешних коротких замыканиях, а пунктирными — при коротких замы-

каниях в защищаемой зоне. Все токи приведены к числу витков вторичной обмотки. На схеме обозначено:

- z_1 и z_2 — сопротивления вторичных цепей трансформаторов тока, состоящие из сопротивлений вторичных обмоток, активных сопротивлений обмоток подмагничивания, контактов и соединительных проводов;
- Δz_{01} и Δz_{02} — сопротивления самоиндукции обмоток подмагничивания (при пренебрежении нелинейностью электрических цепей);
- z_{01} и z_{02} — сопротивления ветвей намагничивания;
- z_p — сопротивление реле;
- I' — ток сквозного короткого замыкания;
- I'_1 и I'_2 — первичные токи трансформаторов при внутреннем замыкании;
- i_1 и i_2 — вторичные токи трансформаторов тока;
- i_{01} и i_{02} — намагничивающие токи.

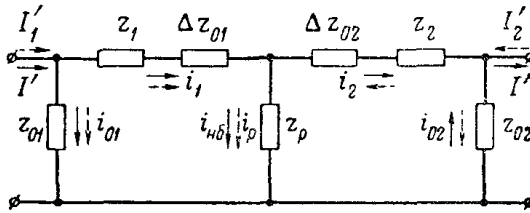


Рис. 1.

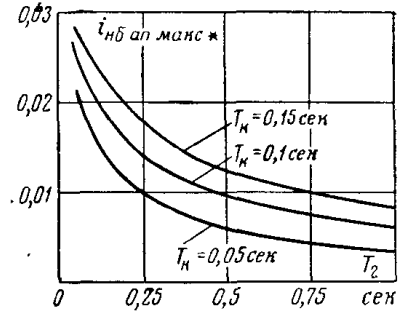


Рис. 2.

Согласно схеме замещения ток небаланса дифференциальной защиты, использующей трансформаторы тока с последовательным подмагничиванием, при внешнем коротком замыкании и $z_p \cong 0$:

$$i_{\text{нб}} = I' \frac{z_{01}z_2 - z_{02}z_1}{(z_1 + z_{01} + \Delta z_{01})(z_2 + z_{02} + \Delta z_{02})}. \quad (2)$$

Считая, что в первичной цепи действует э.д.с $E(t) = E_m e^{j(\omega t + \alpha)} = E_m e^{j\omega t}$, и переходя к операторной форме записи тока небаланса, получим:

$$I_{\text{нб}}(p) = \frac{p E_m p (L_{01}r_2 - L_{02}r_1)}{(r_k + pL_k)(p - j\omega)[r_1 + p(L_1 + L_{01})][r_2 + p(L_2 + L_{02})]}, \quad (3)$$

где L_1 , L_2 — коэффициенты самоиндукции обмоток подмагничивания;
 r_k и L_k — активное сопротивление и коэффициент самоиндукции цепи короткого замыкания.

Комплексное выражение тока небаланса может быть найдено из выражения (3) на основании теоремы разложения. Перейдя от него к мгновенному значению тока небаланса, будем иметь:

$$i_{\text{нб}} = i_m [a \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + b e^{-\frac{t}{T_k}} \sin(\alpha - \varphi_k) + c e^{-\frac{t}{T_1}} \sin(\alpha - \varphi_1) + d e^{-\frac{t}{T_2}} \sin(\alpha - \varphi_2)], \quad (4)$$

где i_m — амплитуда периодической составляющей первичного тока короткого замыкания, приведенная к числу витков вторичной обмотки трансформатора тока;

$$a = \frac{\omega(L_{01}r_2 - L_{02}r_1)}{r_1r_2 \sqrt{(1 + \omega^2 T_1^2)(1 + \omega^2 T_2^2)}};$$

$$b = \frac{T_k(L_{01}r_2 - L_{02}r_1)}{r_1r_2(T_k - T_1)(T_k - T_2)};$$

$$c = \frac{T_1(L_{01}r_2 - L_{02}r_1)}{r_1r_2(T_1 - T_\kappa)(T_1 - T_2)};$$

$$d = \frac{T_2(L_{01}r_2 - L_{02}r_1)}{r_1r_2(T_2 - T_\kappa)(T_2 - T_1)};$$

$$\varphi_\kappa = \arctg \omega T_\kappa, \quad \varphi_1 = \arctg \omega T_1, \quad \varphi_2 = \arctg \omega T_2, \quad \varphi = \varphi_\kappa + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2};$$

$T_\kappa = \frac{L_\kappa}{r_\kappa}$ — постоянная времени первичной цепи;

$T_1 = \frac{L_1 + L_{01}}{r_1}$, $T_2 = \frac{L_2 + L_{02}}{r_2}$ — постоянные времени вторичных цепей.

Известно, что ток небаланса принимает максимальное значение при $\alpha = 0$. При таком значении начального угла э. д. с., а также при всех постоянных времени, превышающих 0,05 сек, если учесть, что

$$\frac{L_{01}}{r_1} \cong \frac{L_{01} + L_1}{r_1} = T_1 \quad \text{и} \quad \frac{L_{02}}{r_2} \cong \frac{L_{02} + L_2}{r_2} = T_2 \quad \text{и} \quad T_1 = nT_2,$$

причем $1,1 < n < 1$,

$$i_{нб} \cong -i_m \frac{n-1}{\omega n T_2} \sin \omega t - i_m \left[\frac{T_\kappa - T_2(n-1)}{(T_\kappa - nT_2)(T_\kappa - T_2)} e^{-\frac{t}{T_\kappa}} + \right. \\ \left. + \frac{T_\kappa}{nT_2 - T_\kappa} e^{-\frac{t}{nT_2}} - \frac{T_\kappa}{T_2 - T_\kappa} e^{-\frac{t}{T_2}} \right]. \quad (5)$$

Как показывает выражение (5), периодическая слагающая тока небаланса обратно пропорциональна постоянной времени вторичной цепи, прямо пропорциональна току короткого замыкания и зависит от разности постоянных времени вторичных цепей трансформаторов тока, убывая с уменьшением ее.

Зависимость максимального значения апериодической составляющей, отнесенной к i_m , от постоянной времени вторичной цепи при разных T_κ , построенная на основании выражения (5), приведена на рис. 2. Как следует из графиков рис. 2, максимальное значение апериодической составляющей увеличивается с уменьшением T_2 и с ростом T_κ .

Правда, приведенные зависимости имеют место при сравнительно больших объемах стали трансформаторов тока. При малых T_2 математическая зависимость $i_{нб \text{ ап}} = f(T_2)$ вследствие сильного насыщения трансформаторов при коротких замыканиях нарушается. Осциллографирование максимальных токов небаланса при различных сечениях сердечников трансформаторов тока показало, что при достаточно малых объемах стали апериодическая составляющая в токе небаланса может отсутствовать. Объясняется это тем, что при протекании по первичным обмоткам трансформаторов апериодического тока со значительной постоянной времени благодаря резкому уменьшению сопротивлений намагничивания максимум апериодического тока намагничивания каждого трансформатора наступает менее, чем за один полупериод. С момента достижения максимума апериодические токи становятся равными первичному апериодическому току и вследствие этого апериодический ток не попадает в дифференциальную цепь. За счет различия во времени наступления максимума апериодическими составляющими токов намагничивания двух трансформаторов возможен выброс тока небаланса, но он благодаря малой продолжительности не может как-либо отразиться на работе защиты. Однако вследствие увеличения периодической составляющей $i_{нб}$ при уменьшении объема стали максимальное действующее значение тока небаланса при малом сечении сердечников трансформаторов оказывается, как показали многочисленные эксперименты, большим такого тока при многообъемных трансформаторах с подмагничиванием.

Таким образом, с точки зрения повышения чувствительности или селективности дифференциальной защиты следует отдать предпочтение трансформаторам тока класса Д, подмагничиваемым вторичным током.

Последнее станет совершенно очевидным, если сравнить токи в реле защит, использующих трансформаторы тока с малым объемом стали и трансформаторы класса Д, подмагничиваемые вторичным током, при внутренних коротких замыканиях.

Ток в реле при замыканиях в защищаемой зоне и одностороннем питании:

$$I_p \cong I'_1 \frac{\omega T_1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}}, \quad (6)$$

т. е. при малой постоянной времени вторичной цепи он в значительной степени зависит от величины этой постоянной, убывая с уменьшением последней.

На рис. 3 приведены зависимости $I_p = f(I'_1)$, полученные экспериментальным путем. Кривая 1 соответствует защите, выполненной при по-

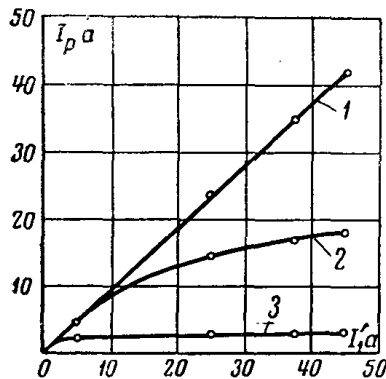


Рис. 3.

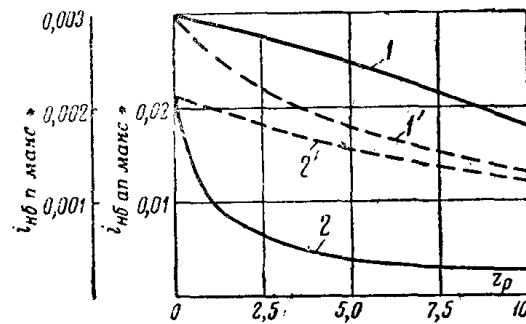


Рис. 4.

мощи трансформаторов тока с $q=20 \text{ см}^2$, $\omega_1=\omega_2=100$ витков и с подмагничиванием вторичным током ($\omega_n/m=10$ витков). Внутреннее короткое замыкание при снятии ее питалось с одной стороны. В цепь реле был включен измерительный прибор с весьма малым сопротивлением. Кривая 2 получена для защиты, использующей трансформаторы тока с $q=1,25 \text{ см}^2$ ($B_{ном} \cong 6000 \text{ гс}$). Как следует из этих графиков, при выполнении защиты при помощи трансформаторов, имеющих малое сечение сердечников, с ростом I'_1 , а следовательно, и насыщения стали трансформаторов наблюдается резкое ухудшение отдачи.

Последняя особенно сильно снижается, если в цепь реле включить какое-либо сопротивление, особенно индуктивное. Так, при включении в цепь реле с пределами изменения уставок 250—1100 ма, имеющего $x_p \cong 1,1 \text{ см}$ и $r_p \cong 0,6 \text{ ом}$, I_p значительно уменьшается (см. кривую 3 рис. 3).

Благодаря относительно плохой отдаче защиты, использующей трансформаторы тока с малым сечением сердечника, коэффициент чувствительности ее имеет недопустимо низкое значение, а защита обладает задержкой в работе при внутренних повреждениях. Защита использующая трансформаторы тока с подмагничиванием вторичным током, лишена указанных недостатков и в связи с этим имеет несомненные преимущества перед защитой, выполненной при помощи трансформаторов тока с малым сечением сердечников.

Для повышения чувствительности, а при принятой чувствительности—селективности дифференциальной защиты Руководящие указания по релейной защите неоднократно рекомендовали вводить в цепи реле добавочные сопротивления. При выяснении вопроса об эффективности

введения в цепи реле дифференциальной защиты, использующей трансформаторы тока с последовательным подмагничиванием, добавочных сопротивлений, а также о рациональном типе их были получены соответствующие выражения для переходного тока небаланса и минимального тока в реле при замыканиях на зажимах генератора. На основании этих выражений были построены кривые зависимостей амплитуды периодической и максимального значения аperiodической составляющей тока небаланса от добавочных сопротивлений в цепи реле. Эти кривые представлены на рис. 4.

Кривая 1 изображает зависимость амплитуды периодической, а кривая 2 — максимального значения аperiodической составляющей тока небаланса в относительных единицах от добавочного активного сопротивления в цепи реле. Поскольку максимум аperiodической составляющей значительно превосходит амплитуду периодической, максимальное значение тока небаланса определяется в основном первой составляющей. Как видно из рис. 4, при введении в цепь реле сравнительно небольших активных сопротивлений ток небаланса значительно уменьшается. При дальнейшем увеличении сопротивления снижение тока небаланса замедляется, в то время как отдача трансформаторов при внутренних замыканиях заметно ухудшается. Тем не менее, коэффициент чувствительности дифференциальной защиты генераторов при увеличении активного добавочного сопротивления в цепи реле растет. Последнее показано на рис. 5, на котором представлены кривые зависимостей коэффициента чувствительности защиты при равных значениях токов внутреннего и внешнего коротких замыканий от добавочных сопротивлений в цепи реле.

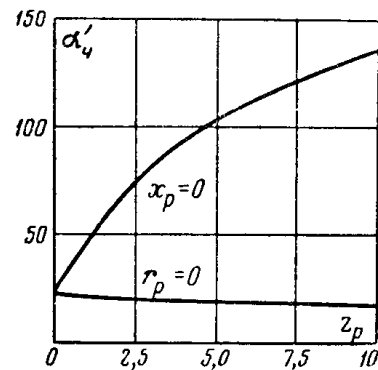


Рис. 5.

Совершенно другой результат получается от введения в цепь реле индуктивного добавочного сопротивления. Такое сопротивление не может существенно влиять на аperiodическую составляющую тока небаланса и сколько-либо заметно уменьшить ее величину (см. кривую 2' рис. 4). Некоторое снижение аperiodического тока небаланса в последнем случае объясняется тем, что с увеличением индуктивного сопротивления время наступления максимума тока небаланса возрастает. Это приводит к большему затуханию составляющих аperiodического тока, а следовательно, и к уменьшению полной его величины. Периодическая составляющая тока небаланса при увеличении индуктивного добавочного сопротивления уменьшается в большей степени, чем при наличии в цепи реле активных сопротивлений (ср. кривые 1' и 1 рис. 4). Но так как ее величина значительно меньше аperiodической слагающей, снижение полного тока небаланса определяется в основном последней.

Снижение тока в реле при внутренних замыканиях с увеличением индуктивного добавочного сопротивления более значительно, чем при активных добавочных сопротивлениях. Последнее объясняется тем, что при достаточно больших индуктивных сопротивлениях ток в реле практически совпадает по фазе с токами намагничивания трансформаторов. Ток короткого замыкания $I_{кз}$ распределяется в этом случае между ветвями намагничивания и реле обратно пропорционально модулям их сопротивлений. При чисто активном сопротивлении цепи реле токи указанных ветвей сдвинуты по фазе на угол, близкий к 90° . Их арифметическая сумма в данном случае превышает $I_{кз}$, т. е. ток в реле при активном добавочном сопротивлении больше, чем при индуктивном такой же величины. Вследствие значительного снижения тока в реле при внутренних замыканиях и сравнительно небольшого уменьшения тока небаланса чувствительность дифференциальной защиты при введении в цепь

реле индуктивного добавочного сопротивления несколько снижается (рис. 5).

Приведенные на рис. 4 и 5 кривые построены на основании полученных аналитическим путем выражений для $I_{нб}$, I_p и α'_u при следующих исходных данных:

- 1) постоянная времени первичной цепи $T_k = 0,1$ сек;
- 2) постоянная времени вторичной цепи одного из трансформаторов $T_2 = 0,1$ сек;
- 3) постоянная времени вторичной цепи другого трансформатора $T_1 = nT_2 = 1,1T_2$;
- 4) суммарное активное сопротивление вторичной цепи трансформатора $r = 0,5$ ом.

Экспериментальная проверка характера полученных математических путем зависимостей подтвердила их достоверность и показала, что при сравнительно небольших добавочных индуктивных сопротивлениях (до 10 ом) ограничение высших гармонических тока небаланса незначительно.

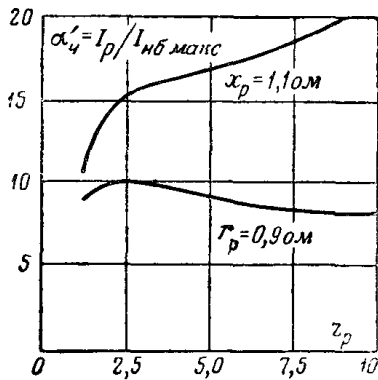


Рис. 6.

Графики изменения коэффициента чувствительности $\alpha'_u = f(z_p)$, полученные на основании снятых опытным путем зависимостей $I_{нб} = f(z_p)$ и $I_p = f(z_p)$ для схемы дифференциальной защиты генераторов, представлены на рис. 6. Схема защиты выполнялась при помощи лабораторных трансформаторов тока с $q = 20$ см², $\omega_1 = \omega_2 = 100$ витков; $\omega_{н/м} = 10$ витков. При проведении экспериментов в дифференциальную цепь

для замера тока небаланса включались реле с общим сопротивлением $(0,9 + j1,1)$ ом, и менялись добавочные к нему активные или индуктивные сопротивления. Поскольку постоянное активно-индуктивное сопротивление в цепи реле имело сравнительно небольшую величину, характер изменения опытных кривых хорошо повторяет характер изменения расчетных графиков (ср. рис. 6 и 5).

Таким образом, для повышения чувствительности дифференциальной защиты генераторов следует в цепи реле включать активные добавочные сопротивления. При принятой в настоящее время чувствительности дифференциальной защиты генераторов нет необходимости применения добавочных сопротивлений в цепи реле, поскольку подмагничивание трансформаторов вторичным током приводит к значительному уменьшению токов небаланса и, безусловно, исключает ложную работу защиты при сквозных коротких замыканиях. Поэтому при использовании трансформаторов тока с последовательным подмагничиванием необходимость включения активных добавочных сопротивлений может возникнуть лишь в связи с повышением требований к чувствительности дифференциальной защиты генераторов. Добавочное сопротивление должно быть ограничено величиной в (5—10) ом, чтобы избежать значительных повышений напряжения во вторичных цепях при внутренних повреждениях.

Выводы

1. Применение трансформаторов тока с подмагничиванием вторичным током для дифференциальной защиты генераторов в значительной мере повышает ее чувствительность или, при принятой чувствительности, селективность, устраняя основную причину появления больших токов небаланса — остаточные потоки в сердечниках трансформаторов тока.

2. С точки зрения обеспечения достаточных коэффициентов чувствительности и скорости действия дифференциальной защиты рекомендуемые для нее трансформаторы тока с последовательным подмагничиванием должны иметь объем стали не менее, чем у трансформаторов тока класса Д. Уменьшение объема стали трансформаторов тока дифференциальной защиты приводит к значительному снижению ее коэффициента чувствительности и задержкам в работе при внутренних повреждениях.

3. При необходимости повышения чувствительности дифференциальной защиты следует включать в цепи реле активные добавочные сопротивления величиной в (5—10) *ом*.

Литература

1. Царев М. И., Дифференциальная защита генератора с вспомогательными быстронасыщающимися трансформаторами, «Электрические станции», 1949, № 7.

2. Нечаев Б. А., К вопросу о применении трансформаторов тока с малым объемом железа для дифференциальных защит генераторов, диссертация, Иваново, 1952.
